

## Выводы

1. В оз. Друкшай уровни активности  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$  и  $^{54}\text{Mn}$  в макрофитах и донных отложениях до закрытия и после закрытия ИАЭС в основном не различались.
2. В каналах сточных вод ПЛК-1,2 и ПВК ИАЭС уровни активности  $^{137}\text{Cs}$  и особенно  $^{60}\text{Co}$  в макрофитах и донных отложениях были выше после закрытия (в 2010–2012 и 2015 гг.), чем до закрытия (в 2007 и 2009 гг.) станции. Следовательно, из ИАЭС в эти каналы радионуклиды могли поступать как до, так и после закрытия станции.
3. Вода оз. Друкшай и каналов сточных вод ИАЭС для тест-организма *Lepidium sativum* была средне токсической до закрытия станции и слабо токсической после ее закрытия.
4. Донные отложения канала сточных вод ПЛК-1,2 ИАЭС и станции мониторинга 7 оз. Друкшай (зона действия сточных вод ПЛК-1,2) для тест-организма *Lepidium sativum* были сильно токсическими как до, так и после закрытия станции. Донные отложения других станций мониторинга оз. Друкшай для тест-организма *Lepidium sativum* были слабо или средне токсическими и различались незначительно как до, так и после закрытия станции.
5. Из полученных нами данных следует, что как радио-экологическая, так и экотоксикологическая ситуация оз. Друкшай как 3 года до закрытия ИАЭС, так и 6 лет после ее закрытия в основном изменились незначи-тельно.

## Литература

1. *Efficient calibration of HPGe detectors for measuring environmental samples* / A. Gudelis, V. Remeikis, A. Plukis, D. Lukauskas // *Environmental and Chemical Physics*. Vilnius. Lithuania. – 2000. – [Vol.] 22(3–4). – P. 117–125.
2. *Magone I. Bioindication of phytotoxicity of transport emission. Bioindication of toxicity of transport emissions in the impact of highway emissions on natural environment.* – Riga : Zinatne, 1989. – 116 p.
3. *Montvydiene D., Marciulioniene D. Assessment of toxic interactions of heavy metals in a multicomponents mixture using Lepidium sativum and Spirodela polyrrhyza* // *Environmental Toxicology*. – 2004. – [Vol.] 19(4). – P. 351–358.
4. *Van der Stricht E., Kirchmann R. Radioecology // Radioactivity and ecosystems.* – 2001. – P. 1–603.
5. *Радиоэкологическая ситуация в оз. Друкшай – водоем-охладитель Игналинской АЭС / Д. Марчюлене, Р. Душаускаене-Дуж, Э. Мотеюнене и др. – Вильнюс : Academia, 1992. – С. 1–215.*
6. *Миграция радионуклидов в пресноводных и наземных экосистемах / А.В. Трапезников, И.В. Молчанова, Е.Н. Карваева и др. – Екатеринбург : Изд-во Уральского университета, 2007. – Т. 1. – С. 1–479.*

## РЕКОНСТРУКЦИЯ ПОСТУПЛЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ (U, TH) В ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ НА ОСНОВЕ ИЗУЧЕНИЯ ВЕРХОВОГО ТОРФЯНИКА

А.М. Межибор<sup>1</sup>, С.И. Арбузов<sup>1</sup>, Л.П. Рихванов<sup>1</sup>, Ю.И. Прейс<sup>2</sup>, А.И. Сысо<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Томский политехнический университет, Томск, Россия

<sup>2</sup>Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

<sup>3</sup>Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, Новосибирск, Россия

## RECONSTRUCTION OF RADIOACTIVE ELEMENTS (U, TH) INPUT IN THE ENVIRONMENT OF WESTERN SIBERIA ACCORDING TO THE STUDY OF AN UPLAND PEATLAND

A.M. Mezhibor<sup>1</sup>, S.I. Arbuzov<sup>1</sup>, L.P. Rikhvanov<sup>1</sup>, Yu.I. Preis<sup>2</sup>, A.I. Syso<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

<sup>2</sup>Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems

<sup>3</sup>Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the RAS, Novosibirsk, Russia

Верховые торфяники представляют собой интерес при эколого-геохимических исследованиях окружающей среды. В данной работе рассматривается временная динамика содержания радиоактивных элементов (Th, U) в верховом торфянике глубиной 11 м. Полученные данные могут рассматриваться в качестве фоновой характеристики содержания урана и тория в верховом торфе Западной Сибири.

Upland peatlands are of interest in environmental geochemical research. This work observes the time dynamic of the concentration of radioactive elements (U, Th) in an upland peatland of 11-meter depth. The data obtained can be used as a background characteristic of the uranium and thorium concentrations in the peat of Western Siberia.



**Рис. 1.** Карта-схема расположения болота Малая Ича

Торфяники активно используются в палеоисследованиях в самых различных направлениях: для изучения химического состава окружающей среды в различные временные периоды, изучения климатических колебаний, изменения геоботанических обстановок, динамики углерода и азота в окружающей среде и т.д. Изучение химического состава верховых торфяников позволяет проследить динамику поступления химических элементов из атмосферы, и, следовательно, косвенным путем определить химический состав приземного слоя атмосферы в разные временные периоды. Наибольший интерес с точки зрения палеоисследований представляют собой торфяники большой глубины, т.к. чем больше мощность торфяника, тем больший возраст он имеет.

В связи с поступлением в окружающую среду радиоактивных элементов в результате антропогенной деятельности, изучение их концентраций в доиндустриальный период, и даже в более ранние эпохи, представляет большой интерес. Доиндустриальным периодом в Сибирском регионе принимаются последние 100 лет с наиболее интенсивным промышленным развитием последние 70–80 лет. Этот период соответствует мощности торфонакопления 10 см и более, при средней скорости аккумуляции торфа в Западной Сибири – 0,8–0,9 мм/год.

В настоящей работе приводятся данные по содержаниям урана и тория в верховом торфянике Малая Ича, расположенном в южной части Большого Васюганского болота, с целью определения фоновых концентраций естественных радиоактивных элементов, которые могут использоваться для сравнительной характеристики при изучении верховых торфов, реконструкции количествен-

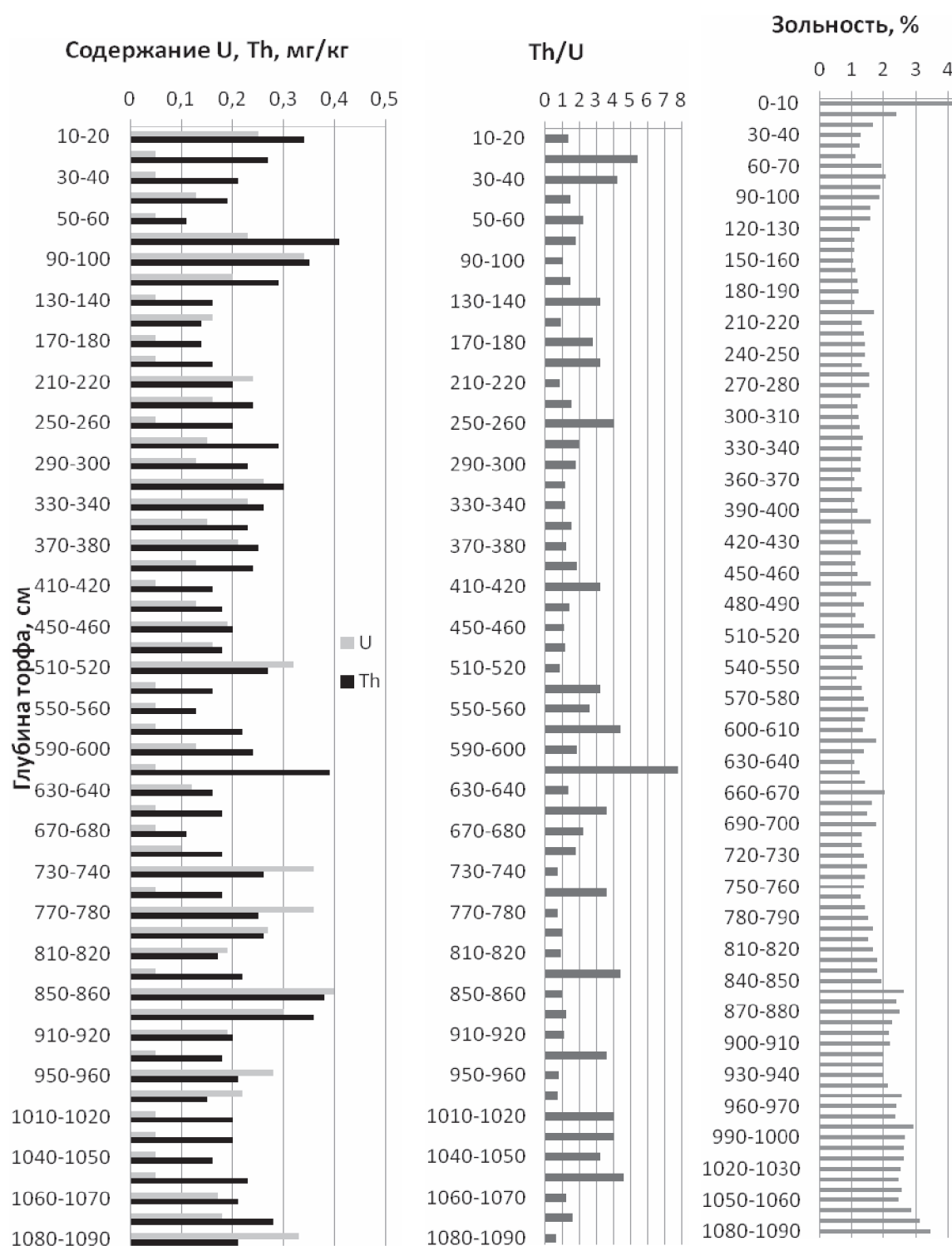
ных содержаний естественных радиоактивных элементов (U, Th) во временном периоде формирования верхового болота и оценки их поступления в окружающую среду из атмосферы.

На юге Западной Сибири между реками Чузик и Ича, на севере Новосибирской области (рис. 1), был обнаружен торфяник глубиной 11 м [8]. Были определены радиоуглеродные датировки болота и описан ботанический состав. По оценкам [8] торфяная залежь формировалась на протяжении почти 10 тыс. лет.

Пробы торфа для исследований были отобраны в 1998 г. в центральной части болота, где исключено непосредственное воздействие с окружающими болото грунтовыми водами. Содержания урана и тория были определены нейтронно-активационным методом в сухом веществе торфа в Ядерно-геохимической лаборатории Кафедры геоэкологии и геохимии Томского политехнического университета.

На рисунке 2 представлено распределение урана и тория в сечении торфяного болота Малая Ича на глубину 10,9 м. Содержание урана в воздушно-сухой массе торфа изученного разреза колеблется от <0,5 до 0,36 мг/кг при среднем его содержании 0,15 мг/кг. Среднее значение урана в торфе болота Малая Ича близко к средним оценкам содержания урана в верховых торфах Западной Сибири (табл. 1). Содержания тория изменяются от <0,11 до 0,41 мг/кг при его среднем показателе 0,22 мг/кг, что несколько ниже средних оценок для Западной Сибири (табл. 1).

Такой важный индикаторный показатель как отношение тория к урану (Th/U) значительно варьирует по глубине и изменяется от 0,64 до 5,4 при среднем значении для разреза 2,2. Th/U для торфов юго-восточной части



**Рис. 2.** Распределение урана и тория, Th/U и зольность в профиле торфяника Малая Ича

Западно-Сибирской плиты составляет в среднем 1,45 [1].

Анализ распределения урана и тория по глубине торфяной залежи показывает, что радиоактивные элементы распределяются в торфе неравномерно: отмечаются интервалы повешенных концентраций как урана, так

и тория (90–100, 850–900 см), либо преимущественного накопления тория (10–20, 610–620 см) или урана (730–740, 1080–1090 см). Из анализа показателя Th/U соответственно отмечаются интервалы торфа с урановой ( $Th/U < 1$ ), смешанной ( $1 < Th/U < 2,5-3$ ) и ториевой природой ( $Th/U > 3$ ).

Таблица 1. Средние содержания урана и тория в болоте Малая Ича в сравнении с литературными данными для верховых торфов

Элементы	Содержание			
	Малая Ича	Среднее для юга Западной Сибири [1, 15]	Среднее для Западной Сибири [6]	Среднее для юга Западной Сибири [3]
U, мг/кг	0,15	0,31	0,07	0,17
Th, мг/кг	0,22	0,45	0,3	0,3
Th/U	2,2	1,45	4,29	1,8
Ad, %	1,8	3,2	–	–

Минимальные содержания урана приходятся на несколько временных периодов (согласно временной шкале [8]). Для периода 5–7 тыс. лет назад характерны значительные изменения в ботаническом составе торфа [8] и на этот период как раз приходится регрессия ледника и значительное потепление климата [10]. Значительное повышение температуры 5–7 тыс. назад было отмечено и по данным изучения палео-гидрологического режима Средне-Васюганского болота [11]. Зольность в этот период мало изменяется. В соответствии с данными палео-гидрологического режима болот Западной Сибири, этот временной интервал характеризуется несколькими

интервалами с низкими содержаниями урана – в периоды высокой температуры и влажности, и высокими содержаниями урана – в периоды снижения влажности при сохранении высокой температуры (рис. 3). Для интервала торфа с 580 по 530 см с низкими содержаниями урана (преимущественно ниже предела обнаружения анализа) с возрастом 5–5,5 тыс. лет назад в соответствии с данными [11] характерно повышение температуры и осадков. Во время климатического оптимума в Европе (Швейцария) были отмечены довольно низкие концентрации урана и тория – 0,029 и 0,07 мг/кг соответственно [14].

В вертикальном распределении тория также отмечена значительная вариабельность. Для тория, в интервале 620–570 см возрастом примерно 5,5–6 тыс. лет назад, характерны повышенные концентрации при наличии высокой температуры и снижении влажности.

Для других интервалов с определить зависимость накопления урана и тория от климатических условий не просто ввиду значительных колебаний температуры и выпадения осадков, а также возможных неточностей датирования и смещения отклика болота на климатические изменения. Тем не менее, существует вероятность зависимости аккумуляции урана и тория в торфяниках от климатических условий, что обсуждается далее.

Уран и торий имеют разный механизм накопления в верховом торфе. Th связан с минеральной частью, U –

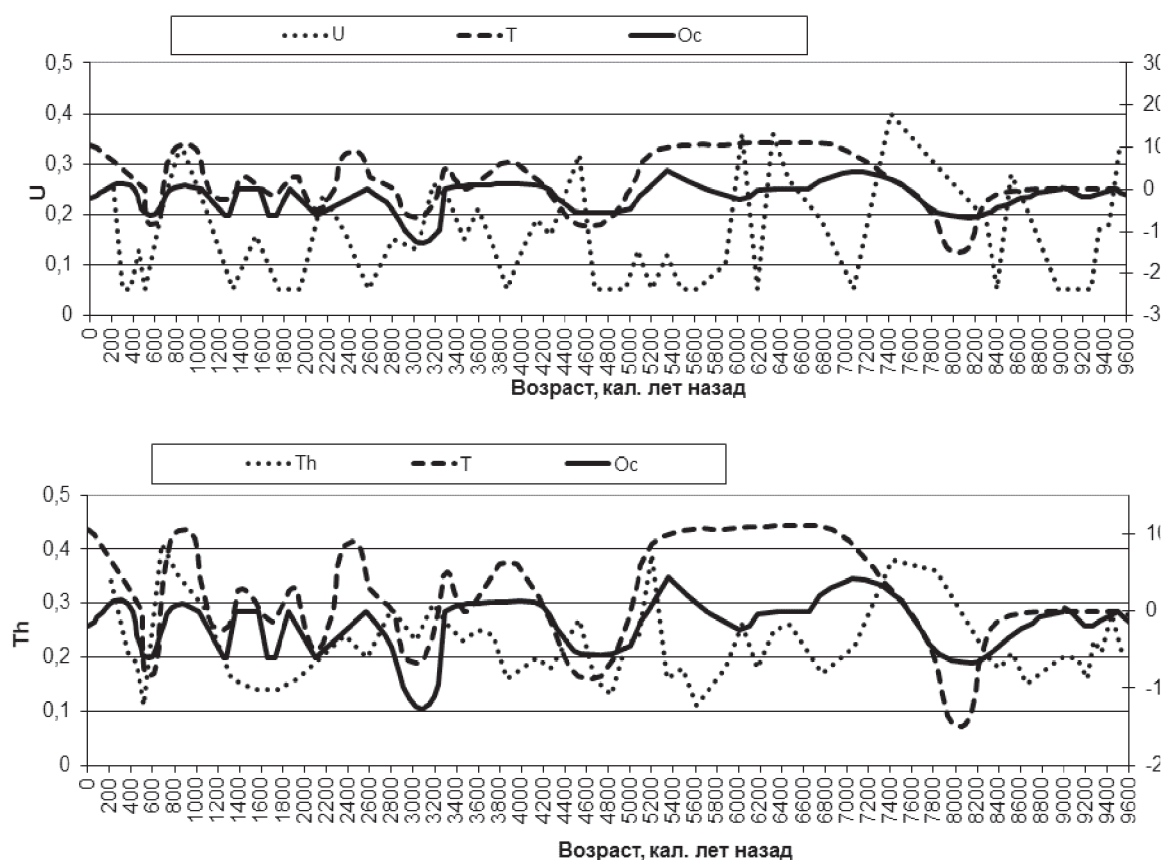


Рис. 3. Зависимость распределения урана и тория в разрезе торфяника Малая Ича от температуры (Т) и влажности (Ос) по Волковой, 1966 [4]

связан с органикой, т.е. с гуминовым веществом торфа [12]. Уран обладает способностью к образованию комплексных соединений с органическими и неорганическими веществами и активно накапливается в торфяниках при наличии источника его поступления, особенно обогащение ураном характерно для образцов низинного торфа [14], где уран поступает в торфяник с грунтовыми водами и накапливается органическим веществом. Торий же в торфяниках присутствует в составе глинистых минералов [7].

Следовательно, изменение урана зависит от растительной составляющей и вероятно подвергается меньшей миграции, чем торий. Предположительно, что в благоприятные для роста сфагновых мхов периоды (интенсивное увлажнение и теплый климат) уровень накопления урана зависит не только от его поступления с пылью, но его “активного захвата” живой частью сфагновых мхов. В засушливые периоды концентрация урана в торфе значительно снижается [9]. Предположительно, климатические факторы оказывали значительное влияние на накопление радиоактивных элементов в торфяниках. Большую роль здесь играет влажность и направление ветра, который может приносить частицы пыли с суходолов.

В литературе указано, что распределение тория коррелирует с минеральной составляющей торфа и поступлением пылевого материала в торфяник, тогда как распределение урана такой корреляции не имеет [14]. Предположительно, торий поступает в торфяники в значительных количествах при пониженной влажности и, следовательно, более активном переносе пыли с ветром. Причем, температура в данном случае не оказывает влияния, и торий может активно поступать в торфяники с пылью как в периоды сухих похолоданий, так и сухих потеплений.

Для определения корреляции поступления радиоактивных элементов с пылью были рассчитаны коэффициенты EF (фактор обогащения). Фактор обогащения рассчитывался относительно содержания скандия в осадоч-

ных породах (распространенных почти повсеместно на территории Западной Сибири). Нормирование по скандию осуществляется для определения объема пылевой составляющей в торфяных болотах [14] по формуле:

$$EF = (M_{\text{проба}} / Sc_{\text{проба}}) / (M_{\text{ос.п.}} / Sc_{\text{ос.п.}}),$$

где  $M_{\text{проба}}$  – содержание химического элемента в пробе;  $Sc_{\text{проба}}$  – содержание скандия в пробе;  $M_{\text{ос.п.}}$  – содержание (кларк) химического элемента в осадочных породах;  $Sc_{\text{ос.п.}}$  – содержание (кларк) скандия в осадочных породах. Кларк осадочных пород принимался по Григорьеву [5]. Использование скандия в определении коэффициента обогащения объясняется его исключительным поступлением в торфяники в результате сноса с окружающих торфяник территорий [2].

Фактор обогащения относительно осадочных пород (EF) показал, что EF(Th) мало варьирует по профилю торфяника и обладает некоторой корреляцией с содержанием скандия в торфе, тогда как EF(U) распределяется крайне неравномерно (рис. 4). Наряду со скандием, Th также может использоваться для оценки поступления с пылью, который, как и скандий и редкоземельные элементы не мигрирует в торфе [13]. В большинстве проб EF(U) превышает 1. Эти данные подтверждают зависимость накопления урана от органической части торфа.

В верхнем интервале торфяника отчетливо видно повышение зольности торфа с глубины 30 см. Предположительно, интервал 0–30 см относится к последнему столетию. Высокая зольность в верхнем интервале вероятнее всего связана с увеличением запыленности атмосферы в результате антропогенной деятельности, т.к. зольность такой величины (4,2%) не была зафиксирована за весь период развития болота (около 10 тыс. лет). Так как фактор обогащения (EF) для тория и урана в верхнем интервале не имеет корреляции с содержанием скандия, то можно предположить наличие антропогенного привноса радиоактивных элементов. Ввиду расположения болота вне прямого воздействия антропоген-

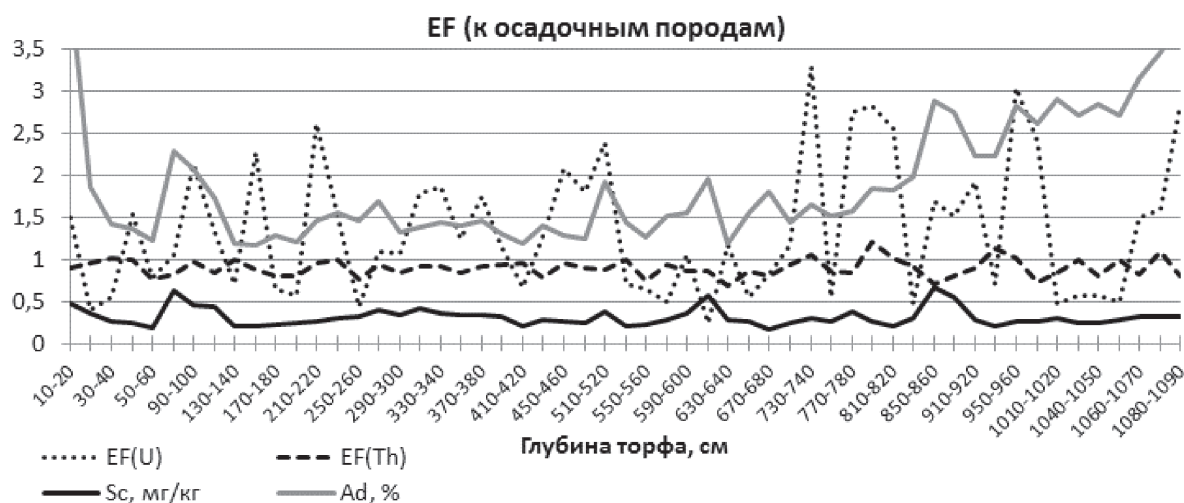


Рис. 4. Фактор обогащения (EF) урана и тория относительно содержания скандия в осадочных породах



ных объектов, наиболее вероятным источником радиоактивных элементов в торфе болота Малая Ича являются испытания ядерного оружия.

По результатам проведения исследований распределения урана и тория в разрезе верхового торфяника глубиной 11 м можно сделать следующие выводы:

- уран и торий в торфе распределяются неравномерно;
- на распределение урана и тория в какой-то степени оказывают влияние климатические факторы; предположительно, что уран накапливается в торфе при повышении температуры и влажности, торий же поступает в торфяник при снижении влажности вне зависимости от температуры;
- установление зависимости накопления урана и тория в торфе не во всех случаях возможно ввиду значительных климатических колебаний в определенные периоды и возможности неточностей датировок и запаздывания отклика болота на климатические изменения;
- торий обладает положительной корреляцией со скандием, что отражает его преимущественное поступление в торфяник с пылью;
- поступление радиоактивных элементов в торфяник в последние несколько десятилетий коррелирует с зольностью и связывается с увеличением пылевой нагрузки, связанной с антропогенной деятельностью.

Болото Малая Ича может рассматриваться в качестве фонового объекта при исследованиях содержаний естественных радиоактивных элементов в верховых торфяниках Западной Сибири, при определении количеств поступления урана и тория в окружающую среду в постиндустриальный период.

#### Литература

1. Среднее содержание некоторых элементов-примесей в торфах юго-восточной части Западно-Сибирской флиты / С.И. Арбузов, В.С. Архипов, В.К. Бернатонис и др. // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 315, № 1. – С. 44–48.
2. Скандий в углях Северной Азии (Сибирь, российский Дальний Восток, Монголия, Казахстан) / С.И. Арбузов, А.В. Волостнов, В.С. Машенькин и др. // Геология и геофизика. – 2014. – Т. 55, № 11. – С. 1649–1660.
3. Волкова В.С. Колебания климата в истории формирования растительности в поцен-четвертичное время в Западной Сибири по данным палинологии // Палинология Сибири / под ред. А.Ф. Хлоновой. – М.: Наука, 1966. – С. 15–29.
4. Веретенникова Е.Э. Содержание и распределение химических элементов в торфах южнотаежной подзоны Западной Сибири // География и природные ресурсы. – 2013. – № 2. – С. 89–95.
5. Григорьев Н.А. среднее содержание химических элементов в горных породах, слагающих верхнюю часть континентальной коры // Геохимия. – 2003. – № 7. – С. 785–792.
6. Инишева Л.И., Цыбукова Т.Н., Веретенникова Е.Э. Содержание химических элементов в торфах южно-таежной подзоны Западной Сибири // Проблемы биогеохимии и геохимической экологии. – 2012. – № 3 (20). – С. 13–21.
7. Кизильштейн Л.Я. Уголь и радиоактивность // Химия и жизнь. – 2006. – № 2. – С. 24–29.
8. Лапшина Е.Д., Мульдияров Е.Я. Основные этапы развития Большого Васюганского болота // Большое Васюганское болото: Современное состояние и процессы развития / под общ. ред. М.В. Кабанова. – 2002. – С. 36–44.
9. Межибор А.М. Эко-геохимические изменения окружающей среды по результатам исследований верховых торфяников Западной Сибири (на примере Томской области) // Международная конференция молодых ученых “Изменения климата и природной среды Северной Евразии: анализ, прогноз, адаптация”. 14–20 сентября 2014 года. Кисловодск. Сборник тезисов докладов. – М.: Геос, 2014. – С. 172–175.
10. Монин А.С., Шишков Ю.А. История климата. – Л.: Гидрометеоиздат, 1979. – 406 с.
11. Преис Ю.И. Детальная реконструкция функционального состояния болота как отклик на изменения континентального климата Голоцена (средняя тайга Западной Сибири) // Известия ТПУ. – 2015. – Т. 326, № 2. – С. 90–99.
12. Geochemistry of radioactive elements (U, Th) in coal and peat of northern Asia (Siberia, Russian Far East, Kazakhstan, and Mongolia) / S.I. Arbuzov, A.V. Volostnov, L.P. Rikvanov et al. // International Journal of Coal Geology. – 2011. – Vol. 86 (4). – 318–328.
13. The inorganic geochemistry of a peat deposit on the eastern Qinghai-Tibetan Plateau and insights into changing atmospheric circulation in central Asia during the Holocene / M. Ferrat, D.J. Weiss, B. Spiro et al. // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 2012. – Vol. 91. – P. 7–31.
14. Krachler M., Shotyk W. Natural and anthropogenic enrichments of molybdenum, thorium, and uranium in a complete peat bog profile, Jura Mountains, Switzerland // Journal of Environmental Monitoring. – 2004. – No. 6. – P. 418–426.
15. Mezhibor A.M., Arbuzov S.I., Rikvanov L.P. Accumulation and average contents of trace elements in the high-moor peat of Tomsk region (Western Siberia, Russia) // Energy exploration and exploitation. – 2009. – Vol. 27, No. 6. – P. 401–410.